

## ОБРАТНЫЕ КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

Всероссийская научная конференция

УДК 532

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ "КУПОЛА — СЕПАРАТОРА" В УСЛОВИЯХ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ

И.А. Чиглинцев, А.А. Насыров

## Аннотация

По причине уменьшения углеводородных запасов на суше разработка пришельфовых месторождений является актуальным направлением в сохранении стабильных уровней производства нефти и газа. В настоящее время в нашей стране происходит активное освоение арктических территорий. Поэтому важно свести к минимуму экологические риски, связанные с утечкой углеводородов из скважин на дне океана, особенно в условиях крайнего севера. В данной работе рассматриваются теоретические основы моделирования "купола-сепаратора" который может быть использован для предотвращения последствий нефтяных и газовых аварий на месторождениях в шельфовой зоне. Построена математическая модель описывающая процесс наполнения и откачки купола при условиях гидратообразования, а так же описана динамика изменения температуры фаз. **Ключевые слова:** углеводороды, гидрат, "купол — сепаратор".

## 1. Основные уравнения

Рассмотрим принципиальную схему цилиндрического купола (рис.1) [1], который устанавливается на дне океана, непосредственно над местом аварии.

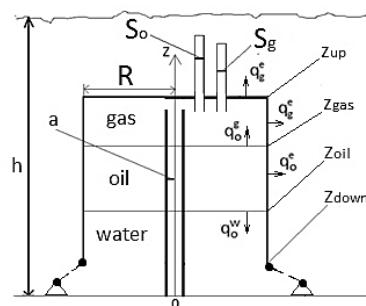


Рис. 1. Принципиальная схема "купола-сепаратора"

здесь  $R$  – радиус купола;  $a$  – радиус скважины;  $z_{up}$ ,  $z_{down}$  – координата верхней и нижней границы купола;  $z_{gas}$ ,  $z_{oil}$  – граница раздела фаз "нефть-газ" и "нефть-вода";  $h$  – расстояние от поверхности до дна океана;  $S_o$ ,  $S_g$  – площади сечения труб для откачки нефти и газа.

По мере заполнения ловушки углеводородной смесью происходит расслоение фаз. Для описания динамики уровня нефти и газа в куполе, полагая, что между ними отсутствует массообмен, запишем уравнение сохранения массы [2]:

$$\frac{dM_j}{dt} = m_j^+, \quad (1)$$

где нижний индекс  $j = o, g$  относится к параметрам нефти и газа,  $M_j$  и  $m_j^+$  – масса и массовый расход  $j$ -го компонента смеси в куполе.

Для режима откачки углеводородов из купола запишем уравнение для массового расхода фаз в виде:

$$m_j^- = \rho_j^0 v_j S_j, \quad (2)$$

где  $\rho_j^0$  – истинная плотность фаз;  $v_j$  – скорость откачки фаз, которая определяется из уравнения:

$$v_j = k \sqrt{\frac{2(p_j - p_0)}{\rho_j^0}}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент Кориолиса;  $p_j$  – давление фазы в верхней части купола;  $p_0$  – давление на поверхности океана.

Давление фаз в верхней части купола будем определять исходя из условия гидростатического равновесия:

$$p_h = p_g + \rho_o g(z_g - z_o) + \rho_w g(z_o - z_d), \quad (4)$$

где  $p_h$  – давление столба жидкости на глубине  $h$ ;  $p_g$  – давление газа под куполом;  $\rho_j$  – плотность фаз;  $z_j$ ,  $z_d$  – координаты границ фаз и нижнего основания купола.

## 2. Разложение газогидрата в "куполе-сепараторе"

Будем считать, что на дне океана реализуются условия гидратообразования. В этом случае за время установки нефтяной ловушки возможно образование гидрата, который в последствии может привести к нестабильной откачке углеводородов. Считаем, что купол заполнен нефтью, водой и гидратом (рис. 2): здесь  $z_h$  – граница

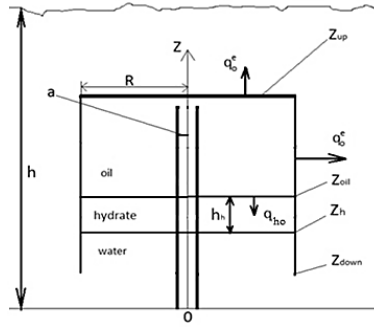


Рис. 2. Принципиальная схема "купола-сепаратора" с гидратом

раздела фаз "гидрат - вода";  $h_h$  – толщина слоя гидрата.

Уравнение сохранения массы для гидрата можно представить в виде:

$$\frac{dM_h}{dt} = \pi(R^2 - a^2)j_h, \quad (5)$$

где  $M_h$  – масса гидрата;  $j_h$  – интенсивность образования гидрата, которая определяется из условия теплового баланса:

$$j_h = \frac{-q_{ho} + q_{hw}}{l}, \quad (6)$$

здесь  $l$  – удельная теплота гидратообразования;  $q_{ho}$ ,  $q_{hw}$  – тепловые потоки от нефти в слой гидрат и от гидрата в воду.

Температуру на границе  $z_h$  будем считать равной равновесной температуре гидратообразования, соответствующей гидростатическому давлению  $p$ :

$$T_s(p) = T_{h0} + T_* \ln\left(\frac{p}{p_{h0}}\right), \quad (7)$$

где  $T_s(p)$  – равновесная температура гидратообразования;  $T_{h0}$ ,  $p_{h0}$ ,  $T_*$  – эмпирические параметры, определяемые на основе экспериментальных данных.

Исходя из решения автомодельной задачи, тепловые потоки можно определить как:

$$q_{ho} = -\lambda_o \frac{(T_s(p) - T_o)}{\sqrt{\pi} \sqrt{\chi_o t}}, \quad q_{hw} = -\lambda \frac{(T_s(p) - T_w)}{\sqrt{\pi} \sqrt{\chi_h t}}, \quad (8)$$

где  $\lambda_h$ ,  $\chi_h$  – коэффициент теплопроводности и температуропроводности гидрата;  $\chi_o$  – коэффициент температуропроводности нефти,  $T_o$ ,  $T_w$  – температура нефти и воды.

Из представленных уравнений можно получить выражение для изменения толщины гидратного слоя в куполе:

$$\frac{dh_h}{dt} = \frac{-q_{ho} + q_{hw}}{l\rho_h}, \quad (9)$$

где  $\rho_h$  – плотность гидрата.

### 3. Численный анализ

Проведены расчеты моделирующие динамику изменения границ фаз и температуры при заполнении и откачки купола. Объемный расход нефти и газа соответственно равны  $1045 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $180 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Параметры скважины и купола имеют значения:  $h=500 \text{ м}$ ;  $a=0.85 \text{ м}$ ;  $R=15 \text{ м}$ ;  $k=1$ ;  $\delta_p=0.005 \text{ м}$ ;  $z_{up}=30 \text{ м}$ ;  $z_{down}=5 \text{ м}$ ;  $S_g=0.0217$ ;  $S_o=0.07$ . Для термодинамических параметров фаз приняты следующие значения:  $\lambda_p=0.25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $T_o=353 \text{ К}$ ;  $T_w=277 \text{ К}$ ;  $\lambda_o=0.12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\rho_o=866 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $c_o=1670 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $T_g=353 \text{ К}$ ;  $\lambda_g=0.03 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $c_g=2365 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\rho_o^0=0.6 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $T_{ho}=283 \text{ К}$ ;  $p_{ho}=6.95 \text{ МПа}$ ;  $T_*=10 \text{ К}$ ;  $l=5 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$ ,  $c_h=2044 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

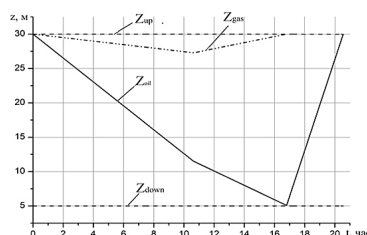


Рис. 3. Движение границ "газ-нефть" и "нефть-вода"

На рис. 3 штрих-пунктирной линией представлена динамика изменения границы "газ-нефть"; сплошной линией показано движение границы "нефть-вода". Штриховыми линиями представлены верхняя и нижняя границы купола. Видно, что отбор газа, при данном значении дебита, происходит приблизительно за 5 часов. После этого купол остаётся полностью заполненным нефтью.

Весь процесс наполнения и откачки углеводородов в "куполе-сепараторе" происходит за 20 часов. Установлено, что при данных значениях дебита, отбор газа необходимо

начинать через 11 часов после начала наполнения купола, во избежание утечки углеводородов из ловушки.

На рис. 4 приведены результаты численных расчетов для изменения температуры нефти и газа на этапе заполнения купола, когда  $z_o = z_g = z_{up}$ . Сплошной линией показано изменение температуры нефти, а штрих-пунктирной - газа. Видно, что температура нефти в течении данного времени изменяется не значительно по сравнению с температурой газа, которая испытывает резкое падение.

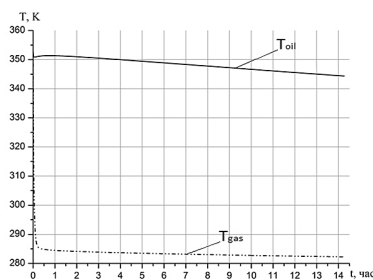


Рис. 4. Изменение температуры нефти и газа при заполнении купола

На рис. 5 показано изменение толщины слоя гидрата в процессе заполнения ловушки нефтью. В этом случае весь поступающий газ отводится на поверхность океана. Начальная толщина гидратного слоя была равна 0.1 м. Видно, что, при данных условиях, интенсивность разложения гидрата в куполе мала.

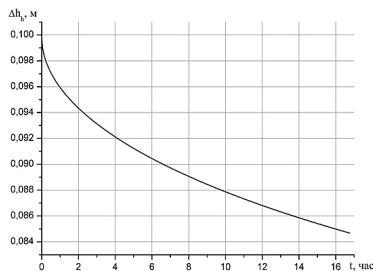


Рис. 5. Изменение толщины слоя гидрата при заполнении купола

#### 4. Заключение

В работе, на основе описанных уравнений, показана динамика изменения температуры и границы фаз, образующихся в результате расслоения углеводородной смеси в "куполе-сепараторе". Установлены характерные времена заполнения и откачки этой смеси из ловушки. Показано, что при реализующихся условиях, интенсивность разложения гидрата  $j_h$  незначительна, что в свою очередь при характерных временах работы купола может привести к закупорки отводящего трубопровода. Поэтому необходимо устранение гидрата еще на первоначальном этапе установки "купола-сепаратора" или проведение дополнительных мероприятий для интенсификации его разложения на дне океана.

#### Summary

*I.A. Chiglintsev, A.A. Nasyrov* THEORETICAL DESCRIPTION OF WORK "DOME – SEPARATOR" UNDER THE CONDITIONS OF HYDRATE FORMATION. Due to the

reduction of hydrocarbon resources on land development at offshore fields is relevant direction in maintaining stable levels of oil and gas production. At present, our country is an active exploration of the Arctic territories. It is therefore important to minimize the environmental risks associated with leakage of hydrocarbons from wells at the bottom of the ocean, especially in the far north. This paper discusses the theoretical basis of modeling "dome-separator which can be used to prevent the effects of oil and gas accidents on offshore oil fields. A mathematical model describing the process of filling and pumping of raw materials from the dome under the conditions of hydrate formation, as well as describe the dynamics of changes in temperature phases.

text. **Key words:** hydrocarbon, hydrate, "dome – separator".

### Литература

1. Жуков А.В., Звонарев М.И., Жукова Ю.А. Способ добычи газа из глубоководных месторождений газогидратов // Междунар. журн. прикл. и фундамент. исслед. 2013. – N 10, ч.1. С. 16-20
2. Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К. Математическая модель наполнения нефтью купола-сепаратора // Дифференциальные уравнения и смежные проблемы: Труды Международной научной конференции. Стерлитамак, 2013. Т.2. С. 103 - 107.

---

**Чиглинцев Игорь Александрович** – кандидат физико-математических наук, ассистент Бирского филиала Башкирского государственного университета, 452453, г. Бирск, Интернациональная, 10.

**Насыров Азат Аскатович** – аспирант Бирского филиала Башкирского государственного университета, 452453, г. Бирск, Интернациональная, 10.

E-mail: *nasaza@mail.ru*